МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.7.044.7 10.23947/1992-5980-2018-18-1-31-37

Магнитно-импульсная обработка кольцевых сварных соединений*

С. В. Каблучев[1], Д. С. Перлов[2], Д. В. Рогозин[3], Е. Л. Стрижаков[4]**
1,2,3,4 Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Magnetic-pulse treatment of ring welded joints***

S. V. Kabluchev[1], D. S. Perlov[2], D. V. Rogozin[3], E. L. Strizhakov[4]**
[1,2,3,4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. В статье обсуждается использование метода магнитно-импульсной обработки, с помощью которой можно устранить и предотвратить дефекты, возникающие в кольцевых швах.
Результаты исследования. Разработан метод использования магнитно-импульсной рихтовки в целях устранения деформаций, которые образуются во время сварки и за счет остаточных напряжений. Сварной шов деформируется и занимает положение, не соответствующее требованиям к изделию. В результате образуется местный изгиб, который составляет 0,5−2,0 мм, и происходит уменьшение диаметра в зоне кольцевого шва
Материалы и методы. Проведен теоретический анализ и опробован практический метод исследования. Для экспериментов используем витой индуктор на раздачу и медные спутники для передачи магнитного давления.
Обсуждение и заключения. Определена возможность использования магнитно-импульсной обработки для устранения и предупреждения деформаций в кольцевых швах. Это позволяет осуществить рихтовку кольцевого шва дистанционно или предварительно деформировать элементы конструкции, гарантируя перед сваркой компенсацию возможных деформаций. Целесообразно обрабатывать трубы и обечайки диаметром 100 мм с толщиной стенки 2-5 мм индуцированием токов, приемом «на раздачу».

Ключевые слова: сварочные деформации, магнитно-импульсная обработка, генератор импульсных токов, индуктор.

Образец для цитирования. Магнитно-импульсная обработка кольцевых сварных соединений / С. В. Каблучев [и др.] // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18 . — С. 31−37.

Introduction. The use of the magnetic-pulse treatment method which helps to eliminate and prevent annular seam defects is considered.
Research Results. The method is developed for using magnetic-pulse alignment to eliminate deformations that are formed under welding and due to residual stresses. The welded seam is deformed and takes the position that fails to meet the product requirements. The result is local bending, which is 0.5−2.0 mm, and the diameter reduction in the annular seam area.
Materials and Methods. Theoretical analysis is performed, and a practical research technique is tested. A twisted inductor for expansion and copper satellites for transmitting magnetic pressure are used for the experiments.
Discussion and Conclusions. The workability of the magnetic-pulse treatment to eliminate and prevent deformations in the annular seams is determined. That makes it possible to align the annular seam remotely, or prestrain structural components ensuring for virtual deformation compensation before the welding. It is expedient to process pipes and rings of 100 mm in diameter with 2-5 mm WT by the current induction, and by the expansion technique.

Keywords: welding deformations, magnetic-pulse treatment, surge-current generator, inductor.

For citation: S.V. Kabluchev, D.S. Perlov, D.V. Rogozin, E.L. Strizhakov. Magnetic-pulse treatment of ring welded joints. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no.1, pp. 31−37.

Введение. Магнитно-импульсная рихтовка (МИР) (рис. 1) основывается на использовании сил электромеханического взаимодействия $P_м$ между вихревыми токами, наведенными в сварной конструкции при

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail:Kabluchev2015@yandex.ru, perlov-denis@mail.ru, dmrogozin@yandex.ru, strizhakov@inbox.ru
***The research is done within the frame of the independent R&D.

пересечении их силовыми линиями магнитного потока H [1, 2]. В отличие от других известных методов деформирования, при МИР электрическая энергия непосредственно преобразуется в механическую, а импульс давления магнитного поля действует непосредственно на шов и околошовную зону l без участия какой-либо передающей среды.

Накапливаемая в батарее конденсаторов энергия сравнительно невелика, но эффективность использования этой энергии на разгон метаемого элемента зависит от правильного расчёта электродинамических сил, действующих на индуктор и деформируемую заготовку. Поэтому важно знать основные параметры процесса магнитно-импульсной обработки металлов (МИО). В данном случае реализуется схема «на раздачу», «отталкиванием» магнитным полем [3]. Емкость накопителя C для различного оборудования МИР выбирается в диапазоне 3÷6 000 мкФ, а рабочее напряжение U составляет 1÷10 кВ. Энергоемкость генераторов импульсных токов (ГИТ) разрядно-импульсного оборудования колеблется в пределах 1÷20 кДж (и более).

Особенностями и преимуществом использования МИР «чистым полем» [3, 4], т.е. в случае, когда не используются электропроводные среды-спутники [8], являются:

— равномерное радиальное приложение нагрузки;

— отсутствие промежуточных сред, бесконтактное воздействие давления магнитного поля на сварную конструкцию,

— возможность осуществления операций рихтовки через стенки неэлектропроводных защитных оболочек в стерильных условиях, вакууме, среде инертных газов;

— импульсный характер нагружения, строгая дозировка энергии;

— высокая производительность процесса.

Основная часть: В кольцевых швах тонкостенных цилиндрических оболочек после сварки возникает окружная усадочная сила *P*, которая действует на оболочку [5,7].

$$P = \frac{\varepsilon_{пл.ост} E s}{r} \qquad (1)$$

где $\varepsilon_{пл.ост}$ — остаточная пластическая деформация, E — модуль упругости, s —толщина стенки оболочки; r — радиус цилиндрической оболочки.

В результате образуется местный изгиб b, который составляет 0,5–2,0 мм, и происходит уменьшение диаметра в зоне кольцевого шва (рис. 1а), которое распространяется примерно на длину:

$$\ell = 3\pi \sqrt[4]{r^2 s^2 / \left[3\left(1-\mu^2\right)\right]} \;/4 \qquad (2)$$

где: μ — магнитная проницаемость материала Гн/м.

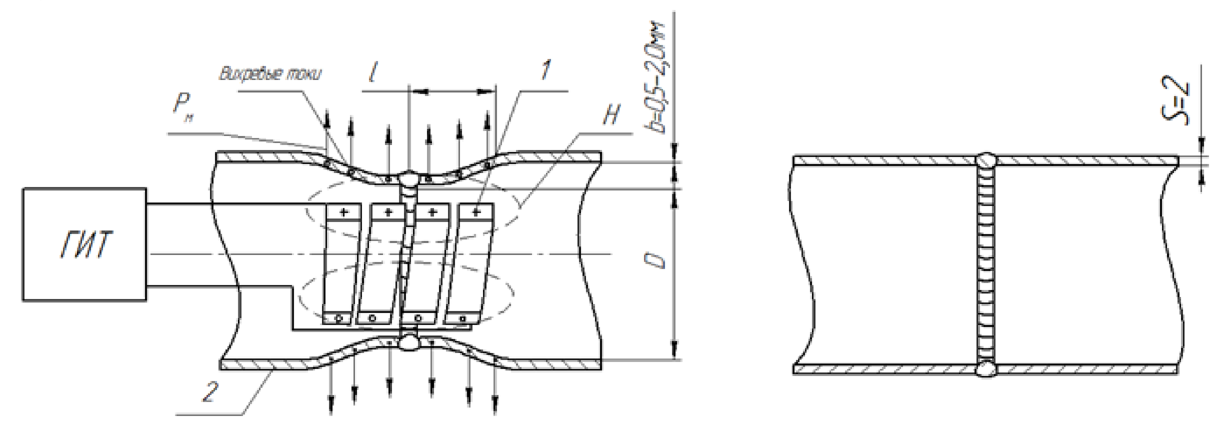


Рис. 1. Принципиальная схема МИР: а — деформированная сваренная трубная конструкция; б — узел после МИР.
1 — индуктор; 2 — обрабатываемый узел; 3 — генератор импульсных токов; b — местный изгиб;
H — магнитный поток; $P_м$ — магнитное давление; l — околошовная зона

*Fig. 1. Layout diagram of magnetic-pulse alignment (MPA): a - deformed welded tube structure; b - node after MPA.
1 - inductor; 2 - node under treatment; 3 - surge-current generator; b - local bending;
H - magnetic flow; $P_м$ - magnetic pressure; l – weld-affected zone*

Существующие методы устранения остаточных деформаций в кольцевых швах трубопровода, такие как пластическое и термическое воздействие, достаточно трудоемки. Одним из способов устранения остаточных напряжений и деформаций является пластическое деформирование шва и околошовной зоны. На кафедре «Машины и автоматизация сварочного производства» (МиАСП) «Донского государственного технического университета» (ДГТУ) имеется большой опыт в использовании методов регулирования деформаций при сварке [6, 7, 12]. Профессором Лукьяновым В. Ф. ранее было предложено новое решение устранения и предупреждения деформаций с помощью магнитно-импульсной обработки (МИО).

Материалы и методы. Во время проведения экспериментов использовались трехвитковые индукторы, являющиеся инструментом для магнитно-импульсной обработки [8].

При установке индуктора внутрь трубы (рис. 1а) и подаче на него высокочастотного импульса, при определенных режимах обработки, можно устранить послесварочные деформации (рис. 1б).

Основными условиями МИО является соотношение толщины детали к глубине проникновения магнитного поля $S_{об} \leq \Delta$ [9]. Здесь:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu y}}, \qquad (3)$$

где: $\omega = 2\pi f$; f — частота тока протекающего по проводнику, Гц; μ — магнитная проницаемость материала, Гн/м; у — удельная электропроводность материала проводника, 1/Ом×метр

После теоретического анализа были проведены эксперименты по определению основных параметров обработки. Деформировались сваренные встык трубы с внутренним диаметром D=100 мм толщиной S равной 1,5 и 2,5 мм. При проведении экспериментов энергия импульса менялась в диапазоне 5–10 кДж (рис. 2). Наибольшая деформация наблюдалась у тонкостенной конструкции (S=1,5), но и разрушение шва («точка разрыва») происходила уже при энергии 7,5 кДж. Разрушение конструкции с толщиной S=2,5 мм произошло при энергии 10 кДж.

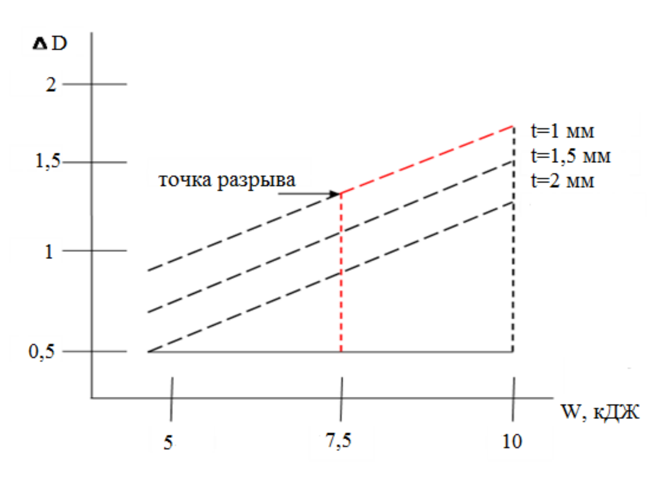


Рис. 2. Зависимость приращения диаметра ΔD от энергии разряда W

Fig. 2. Dependence of diameter increment ΔD on discharge energy W

Для реализации процессов МИО в единичном и мелкосерийном производстве рекомендуется использование «спутников» из сплавов с высокой электропроводностью. В качестве «спутника» используется заготовка из высокоэлектропроводного материала. Например, это намотанная в несколько слоев медная лента. Применение «спутников» позволяет обрабатывать (передавать усилие) заготовки из низкоэлектропроводных материалов. После совместного деформирования заготовки и «спутника» последний удаляется механическим путем.

Переменное магнитное поле H в процессе МИР создается инструментом (индуктором), который питается от генератора импульсных токов магнитно- импульсной установки.

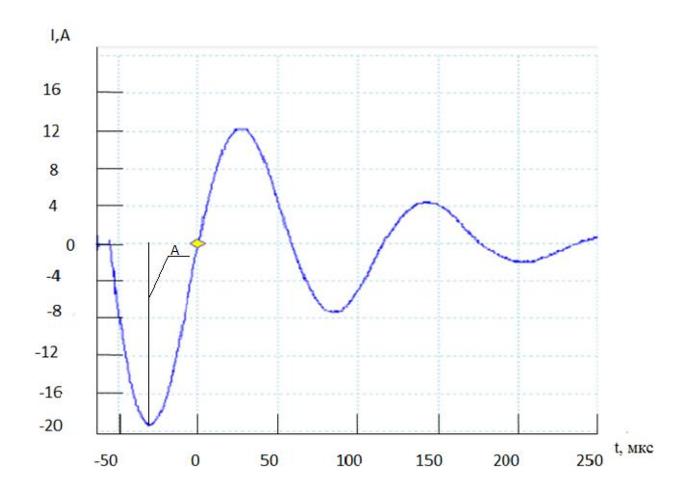


Рис. 3. Осциллограмма разряда тока индуктора

Fig.3. Oscillogram of inductor current discharge

В процессе обработки индуктор испытывает интенсивные силовые и тепловые нагрузки [9, 10, 11]. В экспериментах по рихтовке была использована витая цилиндрическая «катушка» на стеклотекстолитовой основе.

Во время проведения экспериментов с использованием запоминающего осциллографа были зафиксированы затухающие колебания разряда тока I длительность периода t и амплитуда тока первой полуволны А.

В процессе анализа осциллограммы определены параметры разряда импульса: период 120 мкс и амплитуда тока 40–180 кА (рис. 3).

Кроме магнитно-импульсной рихтовки, на кафедре «МиАСП» предложено использовать предварительную отбортовку обечаек или труб для предупреждения остаточных деформаций (рис. 4.)

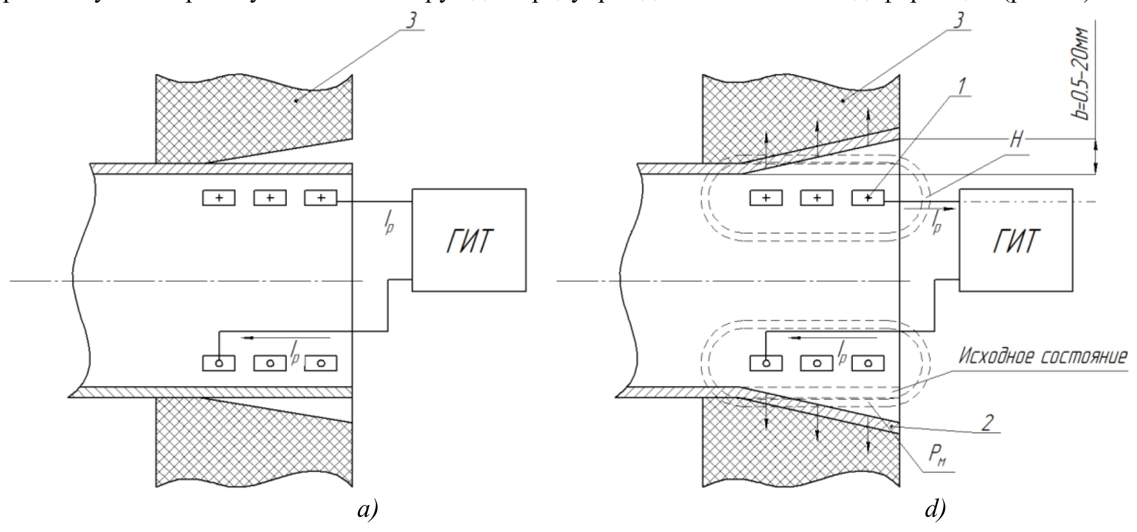


Рис. 4. Схема магнитно-импульсной обработки для раздачи под сварку:
а — исходное состояние; d — конечное состояние.
1 — индуктор, 2 — обрабатываемся деталь, 3 — фиксирующая оправка,
b — величина отбортовки, $I_р$ — ток разряда, H — магнитный поток,
$P_м$ — магнитное давление

Fig. 4. Scheme of magnetic-pulse treatment for weld expansion:
a) initial state, d) final state.
1 — inductor, 2 — workpiece, 3 — fixing mandrel, b — magnitude of crimp seal,
I_p — discharge current, H — magnetic flow, $P_м$ — magnetic pressure

Вокруг деформируемого элемента была установлена специальная фиксирующая оправка (упор). При разряде генератора импульсных токов в индукторе создается электромагнитное поле, под действием которого в заготовке производится деформация торцевого участка. Отбортованные торцы труб привариваются встык. После сварки, за счет остаточных напряжений, сварной шов деформируется и занимает положение,

соответствующее требованиям к изделию. Данный метод обработки был опробован на кафедре "МиАСП" (рис. 5). Условия качественной обработки в этом процессе практически такие же, как и при рихтовке. Величина деформирования торцов труб магнитным полем должна составлять b=0,5–2,0 мм.



a) *b)*

Рис. 5. Обработанные кольцевые сварные соединения:
а — труба после магнитно-импульсной рихтовки,
b — элементы конструкции полученные с предварительной отбортовкой под сварку

Fig. 5. Treated ring joint welds:
a) pipe after magnetic pulse alignment, b) structural elements obtained under weld pre-crimping.

Заключение. Определена возможность использования магнитно-импульсной обработки для устранения и предупреждения деформаций в кольцевых швах. Это позволяет осуществить рихтовку кольцевого шва дистанционно или предварительно деформировать элементы конструкции, гарантируя перед сваркой компенсацию возможных деформаций.

Целесообразно обрабатывать трубы и обечайки диаметром 100 мм с толщиной стенки 2–5 мм индуцированием токов, приемом «на раздачу». В настоящее время проводятся дальнейшие исследования, для увеличения диапазона геометрических размеров обрабатываемых изделий.

Библиографический список

1. Батыгин, Ю. В. Магнитно-импульсная обработка тонкостенных металлов / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский. — Харьков :Мост-Торнадо. — 2002. — 288с.

2. Агеев, С. О. Магнитно-импульсная обработка кольцевых швов / С. О. Агеев [и др.] //Сборник научных трудов I Междунар. науч.-практ. конф. в рамках Открытого международного научно-практического форума «Инновации и инжиниринг в формировании инвестиционной привлекательности региона». — 2016. — С. 298–301.

3. Стрижаков, Е. Л. Разрядно-импульсная обработка материалов / Е. Л. Стрижаков, С. В. Нескоромный, Д. В. Минько. — Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2016. — 152с.

4. McGinley, J.: Electromagnetic pulse technology as a means of joining generation IV cladding materials. Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering ICONE17 July 12-16, 2009, Brussels, Belgium.

5. Казаков, С. И. Сварочные деформации и напряжения: наблюдения и измерения / С. И. Казаков, В.А. Гончаров // Сварка и диагностика : сборник докладов междунар. форума. — Екатеринбург, 24–25 ноября 2015 г.) — С. 68–73.

6. Васильев, В. И. Введение в основы сварки : учебное пособие / В. И. Васильев, Д. П. Ильященко, Н. В. Павлов. — Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. — 317 с.

7. Винокуров, В. А. Сварочные деформации и напряжения / В. А. Винокуров. — Москва : Машиностроение, 1968, 236 с.

8. Глущенков, В.А. Индукторы для магнитно- импульсной обработки материалов: учебное пособие / В. А. Глущенков. — Самара: Издательство «Учебная литература», 2013. — 148с.

9. Глущенков, В. А. Технология магнитно-импульсной обработки материалов: моногр. / В. А. Глущенков, В. Ф. Карпухин. — Самара: Издательский дом «Федоров», 2014. — 208 с.

10. Schäfer R. and Pasquale, P.: Die Elektro magnetische Puls Technologieim industriellen Einsatz.www.pstproducts.com, 2009.

11. Советченко, П. Б. Возможности магнитно - импульсной обработки металлов. Учебное пособие / П. Б. Советченко. — Томск : Изд-во ТПУ, 2003. — 93 с.

12. Лукьянов, В. Ф. Изготовление сварных конструкций в заводских условиях / В. Ф. Лукьянов, В. Я. Харченко, Ю. Г. Людмирский. — Ростов-на-Дону : Феникс, 2009.—315 с.

References

1. Batygin, Y.V., Lavinskiy, V.I. Magnitno-impul'snaya obrabotka tonkostennykh metallov. [Magnetic-pulse processing of thin-walled metals.] Kharkov:Most-Tornado, 2002, 288 p. (in Russian).

2. Ageev, S.O., et al. Magnitno-impul'snaya obrabotka kol'tsevykh shvov. [Magnetic-pulse processing of annular seams.] Sbornik nauchnykh trudov I Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. v ramkakh Otkrytogo mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo foruma «Innovatsii i inzhiniring v formirovanii investitsionnoy privlekatel'nosti regiona». [Ist Int. Sci.-Pract. Conf. within the framework of the Open Int. Sci. and Pract. Forum “Innovations and engineering in the formation of the investment attractiveness of the region”: Coll. Sci. papers.] 2016, pp. 298–301 (in Russian).

3. Strizhakov, E.L., Neskoromny, S.V., Minko, D.V. Razryadno-impul'snaya obrabotka materialov. [Discharge-pulse processing of materials.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2016, 152 p. (in Russian).

4. McGinley, J. Electromagnetic pulse technology as a means of joining generation IV cladding materials. Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering ICONE17 July 12-16, 2009, Brussels, Belgium.

5. Kazakov, S.I., Goncharov, V.A. Svarochnye deformatsii i napryazheniya: nablyudeniya i izmereniya. [Welding deformations and stresses: observations and measurements.] Svarka i diagnostika: sbornik dokladov mezhdunar. foruma. [Welding and diagnostics: Int. Forum Coll. of reports.] Yekaterinburg, 24–25 November, 2015, pp. 68–73 (in Russian).

6. Vasilyev, V.I., Ilyashchenko, D.P., Pavlov, N.V. Vvedenie v osnovy svarki: uchebnoe posobie. [Introduction to welding basics.] Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ. House, 2011, 317 p. (in Russian).

7. Vinokurov, V.A. Svarochnye deformatsii i napryazheniya. [Welding deformations and stresses.] Moscow: Mashinostroenie, 1968, 236 p. (in Russian).

8. Glushchenkov, V.A. Induktory dlya magnitno- impul'snoy obrabotki materialov: uchebnoe posobie. [Inductors for magnetic-pulse treatment of materials.] Samara: Izdatel'stvo «Uchebnaya literatura», 2013, 148 p. (in Russian).

9. Glushchenkov, V.A., Karoukhin, V.F. Tekhnologiya magnitno-impul'snoy obrabotki materialov: monogr. [Technology of magnetic-pulse treatment of materials: monograph.] Samara: Izdatel'skiy dom «Fedorov», 2014, 208 p. (in Russian).

10. Schäfer, R. and Pasquale, P.: Die Elektro magnetische Puls Technologieim industriellen Einsatz.www.pstproducts.com, 2009.

11. Sovetchenko, P.B. Vozmozhnosti magnitno-impul'snoy obrabotki metallov. Uchebnoe posobie. [Possibilities of magnetic-pulse treatment of metals.] Tomsk: TPU Publ. House, 2003, 93 p. (in Russian).

12. Lukyanov, V.F., Kharchenko, V.Y., Lyudmirskiy, Y.G. Izgotovlenie svarnykh konstruktsiy v zavodskikh usloviyakh. [Manufacturing of welded structures under plant conditions.] Rostov-on-Don: Feniks, 2009, 315 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 15.09.2017
Сдана в редакцию 18.09.2017
Запланирована в номер 15.01.2018

Received 15.09.2017
Submitted 18.09.2017
Scheduled in the issue 15.01.2018

Об авторах:

Каблучев Сергей Викторович,
инженер кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» Донского государственного технического университета (ДГТУ) (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9883-0157
kabluchev2015@yandex.ru

Authors:

Kabluchev, Sergey V.,
engineer of the Welding Fabrication Machines and Automation Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9883-0157
kabluchev2015@yandex.ru

Перлов Денис Сергеевич,
инженер-проектировщик ОАО «711 Военпроект» (РФ, 344038, г. Ростов-на-Дону, пр.М.Нагибина 28),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4201-5185
perlov-denis@mail.ru

Рогозин Дмитрий Викторович,
заведующий кафедрой «Машины и автоматизация сварочного производства» Донского государственного технического университета (РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3311-0524
dmrogozin@yandex.ru

Стрижаков Евгений Львович,
профессор кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» Донского государственного технического университета (РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8065-209X
strizhakov@inbox.ru

Perlov, Denis S.,
design engineer, “711 Voenproekt” JSC (RF, 344038, Rostov-on-Don, M. Nagibin pr., 28),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4201-5185
perlov-denis@mail.ru

Rogozin, Dmitry V.,
head of the Welding Fabrication Machines and Automation Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Cand.Sci, (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3311-0524
dmrogozin@yandex.ru

Strizhakov, Evgeny L.,
professor of the Welding Fabrication Machines and Automation Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr.Sci, (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8065-209X
strizhakov@inbox.ru